

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-312715

(43) 公開日 平成8年(1996)11月26日

(51) Int.Cl. ⁹	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
F 1 6 F	15/02	8917-3 J	F 1 6 F	15/02 A
	15/04	8917-3 J		15/04 A
G 0 5 D	19/02		G 0 5 D	19/02 D
G 1 2 B	9/08	6947-2 F	G 1 2 B	9/08 B
H 0 1 L	21/027		H 0 1 L	21/30 5 0 3 F
審査請求 未請求 請求項の数 6 F D (全 10 頁)				

(21) 出願番号 特願平7-146869

(22) 出願日 平成7年(1995)5月23日

(71) 出願人 000001007

キヤノン株式会社

東京都大田区下丸子3丁目30番2号

(72) 発明者 涌井 伸二

東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤノン株式会社内

(72) 発明者 間山 武彦

東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤノン株式会社内

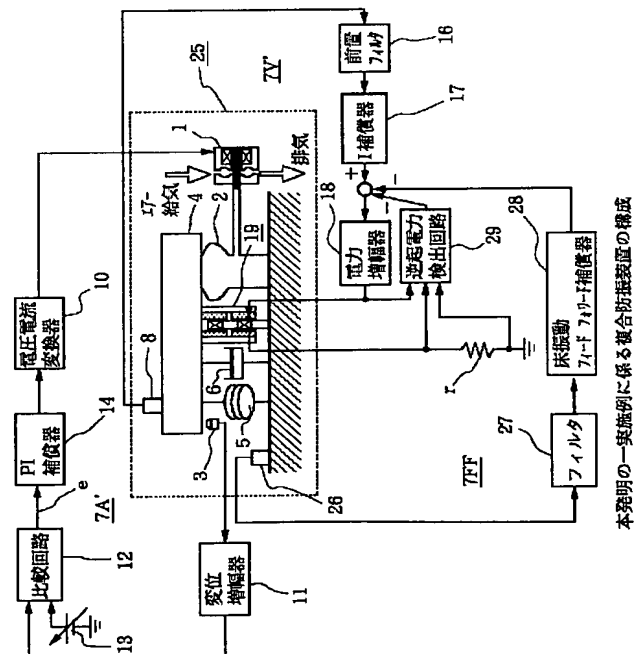
(74) 代理人 弁理士 伊東 哲也 (外1名)

(54) 【発明の名称】 防振装置

(57) 【要約】

【目的】 より低コストで調整の容易な防振装置を提供する。また、ボイスコイルモータが発生する逆起電力に基づいてダンピングを付与する際の特性劣化を改善する。

【構成】 除振台4の振動を抑圧するためのボイスコイルモータ19と、このボイスコイルモータに発生する逆起電力を検出する逆起電力検出手段29、rとを備え、この逆起電力に基づいて前記除振台の振動を抑圧すべく前記ボイスコイルモータを駆動する防振装置において、前記除振台が設置された床の振動を計測する加速度センサ26を備え、この加速度センサの出力にも基づいて前記ボイスコイルモータを駆動する。また、除振台を支持する空気バネ2のアクチュエータおよび除振台の位置をフィードバックさせて除振台を所定の目標位置13に維持すべく空気バネの駆動制御を行なう手段3、10～14、1を有する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 除振台を支持する空気バネのアクチュエータと、
前記空気バネへの作動流体を給気・排気するためのサーボバルブと、
前記除振台の移動距離を計測する位置センサと、
前記位置センサの出力信号と目標電圧とを比較する比較回路と、
前記比較回路の出力に応動して補償信号を生成する P I 補償器と、
前記 P I 補償器の出力に応動して前記サーボバルブの開閉を行わせる電圧電流変換器と、
前記除振台の振動を抑圧するためのボイスコイルモータと、
前記除振台の振動を計測する第 1 の加速度センサと、
前記第 1 の加速度センサの出力信号に対して所定のフィルタリングを行う前置フィルタと、
前記前置フィルタの出力信号を積分するための積分補償器と、
前記ボイスコイルモータの両端電圧と通電電流を検出した電圧とを入力信号として前記ボイスコイルモータに発生する逆起電力を検出するための逆起電力検出回路と、
前記積分補償器の出力信号と前記逆起電力検出回路の負帰還信号とを加算した信号に応動して前記ボイスコイルモータを駆動する電力増幅器と、
前記除振台を設置する床の振動を計測する第 2 の加速度センサと、
前記第 2 の加速度センサの出力信号に対するフィルタリングを行うフィルタと、
前記フィルタの出力信号を受けて床の振動が前記除振台の振動におよぼす影響を軽減ないし排除するための信号を生成して前記電力増幅器の前段にフィードフォワードするための床振動フィードフォワード補償器とを備えたことを特徴とする防振装置。

【請求項 2】 除振台を支持する空気バネのアクチュエータと、
前記空気バネへの作動流体を給気・排気するためのサーボバルブと、
前記除振台の移動距離を計測する位置センサと、
前記位置センサの出力信号と目標電圧とを比較する比較回路と、
前記比較回路の出力に応動して補償信号を生成する P I 補償器と、
前記 P I 補償器の出力に応動して前記サーボバルブの開閉を行わせる電圧電流変換器と、
前記除振台の振動を抑圧するためのボイスコイルモータと、
前記ボイスコイルモータの両端電圧と通電電流を検出した電圧とを入力信号として前記ボイスコイルモータに発生する逆起電力を検出するための逆起電力検出回路と、

前記逆起電力検出回路の負帰還信号に応動して前記ボイスコイルモータを駆動する電力増幅器と、
前記除振台を設置する床の振動を計測する第 2 の加速度センサと、
前記第 2 の加速度センサの出力信号に対するフィルタリングを行うフィルタと、
前記フィルタの出力信号を受けて床の振動が前記除振台の振動におよぼす影響を軽減ないし排除するための信号を生成して前記電力増幅器の前段にフィードフォワードするための床振動フィードフォワード補償器とを備えたことを特徴とする防振装置。

【請求項 3】 前記床振動フィードフォワード補償器は、最適な積分ゲインを有する積分器、あるいは最適な積分ゲインを有する疑似積分器であることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の防振装置。

【請求項 4】 前記床振動フィードフォワード補償器は、最適な積分ゲインを有する 1 次の積分器と最適なゲインを有する 2 次の積分器とを並列接続した伝達関数、あるいは最適な積分ゲインを有する 1 次の疑似積分器と最適な積分ゲインを有する 2 次の疑似積分器とを並列接続した伝達関数を有するものであることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の防振装置。

【請求項 5】 前記床振動フィードフォワード補償器は、最適な積分ゲインを有する 1 次から 4 次までの積分器を並列接続した伝達関数、あるいは最適な積分ゲインを有する 1 次から 4 次までの疑似積分器を並列接続した伝達関数を有するものであることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の防振装置。

【請求項 6】 除振台の振動を抑圧するためのボイスコイルモータと、このボイスコイルモータに発生する逆起電力を検出する逆起電力検出手段とを備え、この逆起電力に基づいて前記除振台の振動を抑圧すべく前記ボイスコイルモータを駆動する防振装置において、前記除振台が設置された床の振動を計測する加速度センサを備え、この加速度センサの出力にも基づいて前記ボイスコイルモータを駆動するものであることを特徴とする防振装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、防振装置に関し、特に露光用 X Y ステージを搭載してなる半導体製造装置の一構成ユニットとして好適に使用される防振装置、特に、空気バネをアクチュエータとした能動的除振装置とボイスコイルモータ（以下、VCM と略記する）をアクチュエータとした能動的除振装置とを複合的に使用した防振装置に関する。

【0002】

【従来の技術】除振台上には振動を嫌う機器群が搭載される。例えば、光学顕微鏡や露光用 X Y ステージなどである。特に、露光用 X Y ステージの場合には、適切かつ

迅速な露光が行われるべく、外部から伝達する振動を極力排除した除振台上に同ステージは搭載されねばならない。なぜならば、露光は露光用XYステージが完全停止の状態で行われなければならないからである。さらに、露光用XYステージは、ステップ&リピートという間欠運転を動作モードとして持ち、繰り返しのステップ振動を自身が発生しこれが除振台の揺れを惹起せしめることにも注意せねばならない。この種の振動が整定しきれないで残留する場合にも、露光動作に入ることは不可能である。したがって、除振台には、外部振動に対する除振と、搭載された機器自身の運動に起因した強制振動の制振性能とをバランスよく実現することが求められている。

【0003】なお、XYステージを完全停止させてから同ステージ上に搭載のシリコンウエハに対して露光光を照射するというステップ&リピート方式の半導体製造装置に代わって、XYステージなどをスキャンさせながら露光光をシリコンウエハ上に照射するスキャン方式の半導体露光装置も登場してきた。このような装置に使われる除振台に対しても、外部振動に対する除振と、その除振台に搭載された機器自身の運動に起因した強制振動に対する制振性能とをバランスよく満たすことが求められることは同様である。

【0004】さて、周知のように、除振台の実現形態は、受動的除振台と能動的除振台とに分類される。除振台上の搭載機器に求められる高精度位置決め、高精度スキャン、高速移動などへの要求に応えるべく近年は能動的除振装置を用いる傾向にある。能動的除振装置に用いられるアクチュエータとしては、空気バネ、ボイスコイルモータ、圧電素子などがある。近年、除振台のさらなる能力向上を目指して、上述した異種のアクチュエータを混合使用してなる能動的除振装置を実現しようという試みがある。このような装置を複合防振装置と呼ぶことにする。

【0005】まず、図3を用い、空気バネをアクチュエータとする能動的除振装置の構成とその動作を説明する。同図において、1は空気バネ2へ動作流体の空気を給気・排気するサーボバルブ、3は除振台4の鉛直方向変位を計測する位置センサ、5は予圧用機械バネ、6は空気バネ2と予圧用機械バネ5および図示しない機構全体の粘性を表現する粘性要素である。これらの構成部品から組み合わされる機構は空気バネ式支持脚15と呼ばれる。次に、空気バネ式支持脚15に対するフィードバック装置7Aの構成とその動作を説明する。まず、加速度センサ8の出力は、適切な増幅度と時定数とを有するローパスフィルタないしバンドパスフィルタ9を介してサーボバルブ1の弁開閉用の電圧電流変換器10の前段に負帰還させている。この加速度フィードバックループにより機構の安定化が図られている。すなわち、ダンピングが付与されるのである。さらに、位置センサ3の出

力は変位増幅器11を通過して比較回路12の入力となっている。ここでは、空気バネ式支持脚15が接する地面に対する目標位置と等価な目標電圧13と比較されて偏差信号eとなる。この偏差信号eはPI補償器14を通過して電圧電流変換器10を励磁する。すると、サーボバルブ1の弁開閉によって空気バネ2内の圧力が調整されて除振台4は目標電圧13で指定した所望の位置に定常偏差なく保持可能となる。ここで、Pは比例、Iは積分動作をそれぞれ意味する。空気バネ2をアクチュエータとした空気バネ式支持脚15は、除振台4の上に大重量物を搭載できる能力を持つ。しかし、空気バネ式支持脚15とフィードバック装置7Aとからなる能動的除振装置に対して高速応答を期待することはできなかった。

【0006】次に、永久磁石と巻線コイルとからなるボイスコイルモータ（以下、VCMと略記する）をアクチュエータとする能動的除振装置の構成とその動作を説明する。加速度センサの出力信号を積分器に通して速度信号に変換し、この信号でVCMを駆動する電力増幅器を励磁し、結果としてダンピングのみ支持する除振台に与えることがフィードバック装置7Vの基本構成になる。図4がVCMをアクチュエータとする能動的除振装置の構成である。同図において、16は加速度センサ8の出力信号を受けてオフセットと高周波の雑音を除去するための適切な前置フィルタ、17は前置フィルタ16の出力信号を速度の次元へと変換するための積分器、18はVCM19を駆動するための電力増幅器、20はVCM式支持脚である。なお、積分器17は必要に応じて疑似積分器としてもよい。VCMをアクチュエータとする能動的除振装置では、俊敏なる応答性を有することが特徴である。しかし、大重量物を位置決めする支持のためには定常的な電流を巻線コイルに通電しておかねばならないので発熱問題を引き起こし不利である。通常、発生した振動のみにVCMが応動するように制御ループが構成される。

【0007】最後に、平板型リニアモータの一例であるVCM19の構造を図5に示す。同図において、21は永久磁石、22は巻線コイル、23は巻線コイル22の支持枠、24は永久磁石21を固定する固定枠である。支持枠23を堅固に固定して巻線コイル22に電流を通電したときには永久磁石21を含めた固定枠24が、固定枠24を堅固に固定して巻線コイル22に電流を通電したときには巻線コイル22を含めた支持枠23がそれぞれ駆動力を得る。

【0008】さて、空気バネをアクチュエータとする能動的除振装置は、大重量物を支持して姿勢の位置制御をすることにおいて優れた能力を持つ。しかし、制御ループの応答が緩慢なので搭載機器が発生する振動の影響を相殺するために、同機器の駆動信号に補償を施して、その補償信号で空気バネのアクチュエータをフィードフォワード的に駆動して振動の影響を抑圧する能力の面では

劣っていた。一方、VCMをアクチュエータとする能動的除振装置は、俊敏なる応答性を有するが装置全体の姿勢を位置決め制御する能力は無いが、もしくは劣っていた。

【0009】そこで、空気バネをアクチュエータとする能動的除振装置に大重量物の姿勢制御を、VCMをアクチュエータとする能動的除振装置に制振制御を主に担当させるべく両者の能動的除振装置を合体させて除振台の除振及び制振性能を向上させることが従来から考えられていた。

【0010】しかし、図3の能動的除振装置と、図4の能動的除振装置とを単純に併合して複合防振装置と成した場合は、図6の複合防振装置を得るのである。同図において、25は空気バネとVCMの両者をアクチュエータとしてもつ複合式支持脚である。当然のことながら、装置構成が複雑化したことによってコスト上昇を招くことがわかる。また、両能動的除振装置のフィードバック装置7A、7Vの錯綜によって制御系のパラメータ調整が煩雑となり、もって装置性能を最高の状態にすることが困難となる事態を招いてしまったのである。さらには、VCMはアクチュエータであると同時に速度センサにもなることが知られており、VCMの駆動によって生じる逆起電力を検出し、これをフィードバックすることによってダンピングを与えるという従来からの技術を適用した場合は、床振動の変位から除振台の変位までの特性を劣化させるという問題があった。

【0011】このような問題に対して、公知例はどのように対処していたのであろうか。まず、空気バネとVCMの両者をアクチュエータとして有する能動的除振装置の公知例として特開平6-117480号公報（『振動除去装置』）等がある。ここでは、空気バネとVCMとを併用した振動除去装置であって、定盤上の大重量物を空気圧バネで支持し、空気圧の変化から定盤に作用する荷重を検出し、その検出信号を適切なアルゴリズムを用いて制御定数を算出してなる補償器を介してVCMを駆動する装置構成が示され、併せて同一の支持脚内に空気バネとVCMとを巧みに配置した構成が開示されている。しかし、VCM自身の逆起電力を利用した装置構成は開示されていなかった。

【0012】さらに、2種類の除振装置を組み合わせた公知例として、特開平6-42578号公報（『半能動型除振装置、半能動型ダンパ装置、半能動型剛性機構装置、縮小投影露光装置及びその半能動型除振方法』）がある。床振動に対する除振効果と、機器内の移動反力に対する制御効果とを両立させる目的で案出されたものであり受動型除振装置と並列に、受動型ダンパ部材もしくは受動型バネ部材と、電磁石およびこれを制御するコントローラから構成された半能動型ダンパ装置もしくは半能動型剛性機構装置を開示している。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】空気バネをアクチュエータとした能動的除振装置と、VCMをアクチュエータとした能動的除振装置とを複合的に使用してなる複合防振装置を構成する場合は、装置構成の複雑化に伴ってコスト上昇を招くという課題があった。また、フィードバック装置の錯綜に伴ないパラメータ調整が煩雑化し、所望の特性へ持ち込むことが困難という問題を抱えていた。さらには、VCMの駆動によって生じる逆起電力を検出し、これをフィードバックすることによってダンピングを与えるという従来からの技術を適用した場合において、床振動の変位から除振台の変位までの特性を劣化させるという課題が残されていた。

【0014】本発明の目的は、このような従来技術の課題に鑑み、より低コストで調整の容易な防振装置を提供することにある。また、VCMに発生する逆起電力に基づいてダンピングを付与する際の上述の特性劣化を改善することにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】この目的を達成するため本発明の防振装置は、除振台を支持する空気バネのアクチュエータと、空気バネへの作動流体を給気・排気するためのサーボバルブと、除振台の移動距離を計測する位置センサと、位置センサの出力信号と目標電圧とを比較する比較回路と、比較回路の出力に応動して補償信号を生成するPI補償器と、PI補償器の出力に応動してサーボバルブの弁開閉を行わせる電圧電流変換器と、除振台の振動を抑圧するためのボイスコイルモータと、除振台の振動を計測する第1の加速度センサと、第1の加速度センサの出力信号に対して所定のフィルタリングを行う前置フィルタと、前置フィルタの出力信号を積分するための積分補償器と、ボイスコイルモータの両端電圧と通電電流を検出した電圧とを入力信号としてボイスコイルモータに発生する逆起電力を検出するための逆起電力検出回路と、積分補償器の出力信号と逆起電力検出回路の負帰還信号とを加算した信号に応動してボイスコイルモータを駆動する電力増幅器と、除振台を設置する床の振動を計測する第2の加速度センサと、第2の加速度センサの出力信号に対するフィルタリングを行うフィルタと、フィルタの出力信号を受けて床の振動が除振台の振動におよぼす影響を軽減ないし排除するための信号を生成して電力増幅器の前段にフィードフォワードするための床振動フィードフォワード補償器とを備えたことを特徴としている。

【0016】また、本発明の他の態様に係る防振装置は、上述した防振装置の構成要素の中で、除振台に設置した第1の加速度センサと、前記第1の加速度センサの出力信号に対して所定のフィルタリングを行なう前置フィルタと、前記前置フィルタの出力信号を積分するための積分補償器とを省いた装置構成であることを特徴とする。

【0017】また、別の側面からみれば、本発明の防振装置は、除振台の振動を抑圧するためのボイスコイルモータと、このボイスコイルモータに発生する逆起電力を検出する逆起電力検出手段とを備え、この逆起電力に基づいて前記除振台の振動を抑圧すべく前記ボイスコイルモータを駆動する防振装置において、前記除振台が設置された床の振動を計測する加速度センサを備え、この加速度センサの出力にも基づいて前記ボイスコイルモータを駆動するものであることを特徴とする。

【0018】

【作用】VCMに代表されるコイルアクチュエータは文字どおりアクチュエータであるが、同時にセンサとしての機能を合わせてもつ。VCMを駆動したときに生じる逆起電力は速度に比例しており、これが検出可能となればアクチュエータであると同時に速度センサにもなるのである。このような原理を踏まえ、VCMなどコイルアクチュエータから速度成分を検出し、それをフィードバックして被駆動体に対してダンピングを与えることは従来から様々な装置に対して実施されてきた。

【0019】ゆえに、空気バネをアクチュエータとする能動的除振装置と、VCMをアクチュエータとする能動的除振装置とを複合した複合防振装置においても、強力なダンピングを与えるために、VCMに発生する逆起電力を検出してこれをフィードバックすることが考えられるわけである。しかし、除振台に取り付けられたVCMにおいて発生する逆起電力は、除振台と設置床との間の相対速度である。よって、相対速度のフィードバックは、除振台にダンピングを付与すると同時に、床振動の影響を除振台へ伝え易くするという弊害ももたらしたのであった。そこで、床の振動状態を検出する第2の加速度センサの出力に適切な補償を施し、この補償信号でVCMを駆動すると、VCMに発生する逆起電力のフィードバックに原因した上述の特性劣化を補正するよう作用するのである。

【0020】

【実施例】本発明の一実施例に係る複合防振装置の構成を図1に示す。同図において、共通または対応する部分には同一符号を付けて、その部分の詳細な説明は省略する。さて、26は床の振動を検出するための第2の加速度センサ、27は第2の加速度センサ26の出力を電気信号に変換してオフセットや高周波雑音を除去するためのフィルタ、28は床振動フィードフォワード補償器でありこの出力はVCM19を駆動する電力増幅器18の前段に負帰還されている。これらのループはフィードフォワード装置7FFと呼ばれる。29は逆起電力検出回路である。従来のフィードバック装置7Vに対して29が新たに付加されたフィードバック装置7V'を構成している。逆起電力検出回路29の出力信号は電力増幅器18の前段に負帰還されているが、ここではVCM19のコイル両端電圧と、検出抵抗rの電圧降下によって感

知したコイル電流とを入力信号としてコイルに発生する逆起電力が検出される。なお、空気バネをアクチュエータとする能動的除振装置とVCMをアクチュエータとする能動的除振装置とを単純に併合してなる複合防振装置（図6）の場合は、前者の装置におけるローパスフィルタないしバンドパスフィルタ9を通る信号のループと、後者の装置そのものであるメインループは、共に閉ループに対するダンピング付与の機能を持つ。よって、複合防振装置（図6）のダンピングを調整するループは二重となり、コストアップを招くのみならず調整作業も煩雑となる。ゆえに、図1では空気バネをアクチュエータとして有する能動的除振装置において、本来備えていた加速度のフィードバックループを除去したフィードバック装置7A'を構成する。

【0021】以下、逆起電力の検出の意義および原理を説明する。検出の意義は、速度情報の活用にある。すなわち、コイルモータであるところのVCMはアクチュエータであると同時に、速度情報を検出するセンサとしても利用できるのである。速度情報が検出できれば、これを閉ループ系へのダンピングとして活用することができ、多くの公知例が知られている。例えば、文献『樋口、池田：逆起電力検出信号を用いたPM形ステップモータの閉ループ制御駆動、精密工学会誌、Vol. 55, No. 12, p. 2197-2202』がある。VCMによる速度情報、すなわち逆起電力の検出原理の詳細は、文献『橋谷、岡田、永井：センサレス能動制振の研究（動電アクチュエータによる速度推定と制御）、日本機械学会論文誌C、58巻554号、p. 2912-2917』に記載されている。簡単に図7を参照して説明しておく。まず、以下の回路方程式が成立する。

【0022】

【数1】

$$e = e_b + Ri + L \frac{di}{dt}$$

ただし、記号の意味は以下の通りである。

【0023】e [V] : コイル両端電圧

e_b [V] : 逆起電力

R [Ω] : コイル抵抗

L [H] : コイルインダクタンス

i [A] : コイルに流れる電流

ここで、コイルに流れる電流 i を検出する抵抗 r の両端電圧 e_i は r i となる。したがって、数1式は数2式のように変形できる。

【0024】

【数2】

$$e = e_b + \frac{R}{r} e_i + \frac{L}{r} \frac{de_i}{dt}$$

ここで、逆起電力 e_b は、移動物体の速度 v に比例し、

その比例係数を k_v とおけば、 $e_b = k_v v$ となる。したがって、速度 v は数3式の演算を施すことによって算出可能である。

【0025】

【数3】

$$v = \frac{1}{k_v} \left[e - \left(\frac{R}{r} e_i + \frac{L}{r} \frac{de_i}{dt} \right) \right]$$

逆起電力検出回路29では、数3式に示した内容の演算が行われて速度 v と等価な電気信号が検出されるのである。ただし、数3式によれば e_i の微分値が必要になるが、実用の範囲内において疑似微分を用いても構わない。

【0026】次に、図1に示した本発明の一実施例に係る複合防振装置の制御ブロック図(図8)に基づき、VCM19で発生する逆起電力の単純なるフィードバックが床の振動を除振台4に伝達しやすくするという弊害があることを説明する。図中で使用する記号の意味は以下の通りである。

【0027】 x [m] : 除振台の変位、 x_0 [m] : 床の変位、 r [V] : 目標電圧13、 f_{dis} [N] : 外乱、 M [Kg] : 質量、 C [N・sec/m] : 粘性摩擦係数、 K [N/M] : パネ定数、 k_{a0} [V・sec²/m] : 第2の加速度センサ26からフィルタ27までのゲイン(簡単のため、フィルタ27はゲインとする。)、 k_a [V・sec²/m] : 第1の加速度センサ8から前置フィル16までのゲイン(簡単のため、前置フィル16はゲインとする。)、 B [1/sec] : 積分補償器17の積分ゲイン、 K_t [N/V] : 電力増幅器18とVCM19を含めた力変換ゲイン、 k_v [V・sec/m] : VCM19と逆起電力検出回路29を含めた速度検出ゲイン、 A [N/V・sec] : 電圧電流変換器10、サーボバルブ1、および空気バネ2を含めた積分変換ゲイン、 k_{pos} [V/m] : 位置センサ3と変位増幅器11を含めた位置ゲイン、 k_p [V/V] : PI補償器14のPゲイン、 k_i [1/sec] : PI補償器のIゲイン、 $G_{ff}(s)$ [-] : 床振動フィードフォワード補償器28の伝達関数、 s : ラプラス演算子

図8より、 x_0 と x の間の関係を求める。ただし、簡単のために、空気バネ2に対する位置のフィードバックループと床振動フィードフォワード補償器28はともにないものとする。このとき、数4式を得る。

$$x = \frac{A(k_p s + k_i)}{DN(s)} r + \frac{s^2}{DN(s)} f_{dis} + \frac{(C + K_t k_v) s^3 + k_s^2 + A(K_p s + k_i) k_{pos} - k_{a0} G_{ff}(s) K_t s^4}{DN(s)} x_0$$

【0034】

【数9】

$$DN(s) = Ms^4 + \{C + K_t(Bk_a + k_v)\}s^3 + Ks^2 + Ak_p k_{pos} s + Ak_i k_{pos}$$

【0028】

【数4】

$$X = \frac{(C + K_t k_v) s + K}{Ms^2 + \{C + K_t(Bk_a + k_v)\} s + K} x_0$$

数4式より、逆起電力のフィードバックにより分母多項式における s の1次項、すなわち粘性項は増加しており、したがってダンピングが付与できていることが分かる。しかし、同時に分子多項式における s の1次項への影響もあり、床の変位 x_0 から除振台の変位 x までの抑圧能力を劣化させてしまうという問題を生じせしめていた。VCM19に発生する逆起電力を単純に負帰還しただけでは弊害をもたらすわけである。

【0029】そこで、 $G_{ff}(s)$ のループを投入して逆起電力のフィードバックによって生じる悪影響を除去する。 $G_{ff}(s)$ を挿入したとき、数5式の関係がある。

【0030】

【数5】

$$X = \frac{(C + K_t k_v) s + K - k_{a0} K_t G_{ff}(s) s^2}{Ms^2 + \{C + K_t(Bk_a + k_v)\} s + K} x_0$$

したがって、逆起電力のフィードバックによる分子多項式への影響のみを排除したい場合には、 $G_{ff}(s)$ を数6式のように選べばよい。

【0031】

【数6】

$$G_{ff}(s) = \frac{k_v / k_{a0}}{s}$$

また、数7式のように $G_{ff}(s)$ を設計すると床の変位 x_0 が除振台の変位 x におよぼす影響をなくすることができる。

【0032】

【数7】

$$G_{ff}(s) = \frac{(C + K_t k_v) s + K}{k_{a0} K_t s^2}$$

ただし、数6式と数7式はいずれも空気バネ2に対する位置のフィードバックがない場合である。この位置のフィードバックを投入したときには、 x 、 r 、 f_{dis} 、 x_0 の間の関係は数8式と数9式で表現できる。

【0033】

【数8】

ここで、数6式のように、 $G_{ff}(s)$ を選んだとき、数8式における x_0 から x までの関係は数10式となる。やはり、逆起電力のフィードバックが x_0 から x への伝達関数の分子多項式におよぼす影響は除去することがで

きる。

【0035】

【数10】

$$x = \frac{Cs^3 + Ks^2 + A(k_p s + k_i)k_{pos}}{DN(s)} x_0$$

数7式のように $G_{ff}(s)$ を選んだときには、数8式における x_0 と x の関係は数11式となる。

【0036】

$$G_{ff}(s) = \frac{(C + K_t k_v) s^3 + K s^2 + A k_p k_{pos} s + k_i k_{pos}}{k_{ao} K_t s^4}$$

上述の解析より、床振動フィードフォワード補償器28の伝達関数 $G_{ff}(s)$ を、数6式よりも数7式のように、さらには数7式よりも数12式と選ぶとき、 x_0 から x までの応答をよりよく抑制することができる。もちろん、数6式から数7式、数7式から数12式の順番に実装は困難になる。また、完全積分器の実現が困難な場合は、必要に応じて疑似積分器を用いてもかまわないものとする。しかし、いずれの場合においても $G_{ff}(s)$ が未挿入のときに比較すれば、 x_0 から x までの応答をよく抑制できることは確かである。したがって、現実的には x_0 から x までの応答に対して求められている仕様に依じて、適切な $G_{ff}(s)$ を設計し、これを実装すればよいことになる。

【0038】まとめると、数6式は、床振動フィードフォワード補償器28が最適な積分ゲインを有する積分器であることを意味する。実用的には、最適な積分ゲインを有する疑似積分器であっても構わない。

【0039】また、床の振動が除振台の振動におよぼす影響を数6式に基づく床振動フィードフォワード補償器28の場合よりもさらに抑圧せんと欲する場合には、数7式のように床振動フィードフォワード補償器28を構成する。すなわち、最適な積分ゲインを有する1次の積分器と最適な積分ゲインを有する2次の積分器とを並列接続した伝達関数を持つ床振動フィードフォワード補償器28を設計すればよい。上述と同様に、実用的には最適な積分ゲインを有する1次の疑似積分器と最適な積分ゲインを有する2次の疑似積分器とを並列接続した伝達関数であっても構わない。

【0040】床の振動が除振台の振動におよぼす影響を完全に除去するためには、数12式のように床振動フィードフォワード補償器28を構成する。すなわち、最適な積分ゲインを有する1次から4次までの積分器を並列接続した伝達関数を持つ床振動フィードフォワード補償器28を設計すればよい。実用的には、最適な積分ゲインを有する1次から4次までの疑似積分器を並列接続した伝達関数であっても構わない。

【0041】（実施例の変形）図2は、本発明の第2の実施例に係る複合防振装置の構成を示す図である。図1

【数11】

$$x = \frac{A(k_p s + k_i)k_{pos}}{DN(s)} x_0$$

さらに、 x_0 が x におよぼす影響を完全に消去するためには、数12式のように $G_{ff}(s)$ を設計すればよい。

【0037】

【数12】

と異なる箇所は、除振台4の振動を検出する第1の加速度センサ8を除去しており、必然的に前置フィルタ16と積分補償器17をも不要となしていることにある。つまり、複合防振装置へのダンピング付与は逆起電力検出回路29の出力で電力増幅器18を励磁するループの働きのみ委ねられる。もちろん、逆起電力のフィードバックによる床の振動が除振台の振動におよぼす悪影響は、床振動フィードフォワード補償器28の伝達関数を最適に選択することによって排除できる。また、床の振動が除振台の振動におよぼす影響そのものを軽減ないし完全に除去するための最適な伝達関数を選択することも可能である。

【0042】なお、説明を簡便に行うために、図1および図2における複合式支持脚25は鉛直方向1軸について図示された。しかし、水平方向に対しても同様の装置構成になる。また、複合式支持脚25を鉛直および水平方向に複数個用いて、各除振台の上に平板状の定盤などを設置してなる装置構成も本発明の範囲に属することは言うまでもない。また、図1の実施例ではアナログ演算回路で制御系を構成しているが、この内の一部もしくは全部を電子計算機のようなデジタル演算装置で置き換えても構わない。

【0043】

【発明の効果】以上説明したように本発明によれば、除振台の振動を加速度センサで検出し、その電気信号に適切な補償を施した信号でVCMを駆動することによって付与されるダンピングに加え、VCMの逆起電力のフィードバックによるダンピングも加算される。結果として強力なダンピングを除振台に付与することができる。

【0044】また、床振動フィードフォワード補償器の伝達関数を適宜かつ最適に設計することにより、VCMの逆起電力フィードバックによって強化したダンピング性能を損なわずに、床の振動が除振台の振動におよぼす影響を取り除くことができる。

【0045】さらに、除振台へのダンピング付与をVCMの逆起電力によるフィードバックのみに頼る場合は、除振台の振動を検出する加速度センサが不要となるばかりか、その加速度センサの出力に適切な補償を掛けてV

CMを駆動する制御ループをも除去することができる。したがってコスト低減に寄与するところ大の効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の一実施例に係る複合防振装置の構成を示す図である。

【図 2】 本発明の第二の実施例に係る複合防振装置の構成を示す図である。

【図 3】 空気バネをアクチュエータとする能動的除振装置の構成を示す図である。

【図 4】 VCMをアクチュエータとする能動的除振装置の構成を示す図である。

【図 5】 VCMの一構造を示す図である。

【図 6】 能動的除振装置を単純に併合した複合防振装置を示す図である。

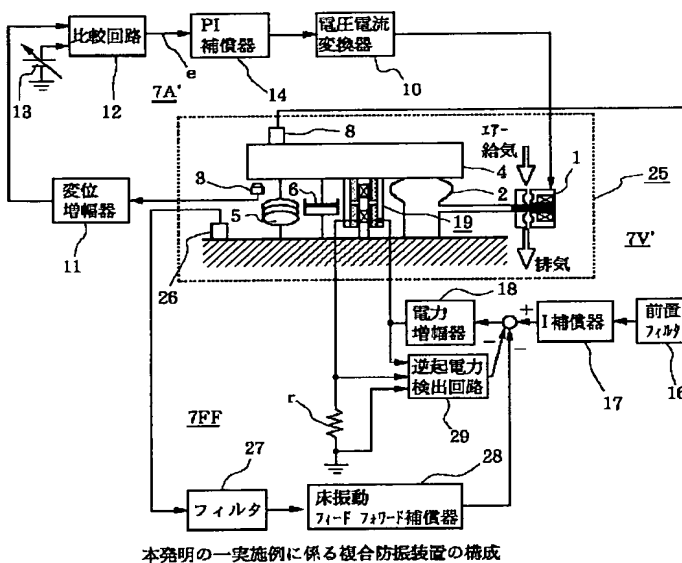
【図 7】 逆起電力検出の原理説明図である。

【図 8】 複合防振装置の制御ブロック図である。

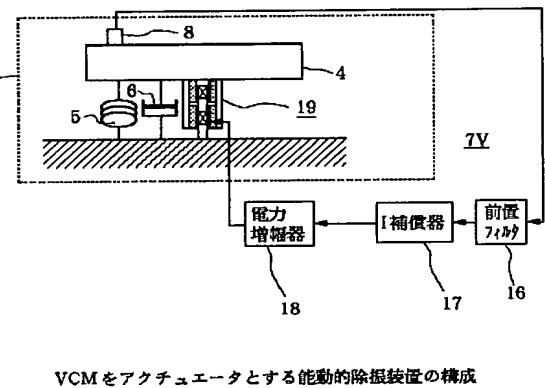
【符号の説明】

1：サーボバルブ、2：空気バネ、3：位置センサ、4：除振台、5：予圧用機械バネ、6：粘性要素、7A、7A'、7V、7V'：フィードバック装置、7FF：フィードフォワード装置、8：第1の加速度センサ、9：ローパスフィルタないしバンドパスフィルタ、10：電圧電流変換器、11：変位増幅器、12：比較回路、13：目標電圧、14：PI補償器、15：空気バネ式支持軸、16：前置フィルタ、17：積分補償器、18：電力増幅器、19：VCM、20：VCM支持脚、21：永久磁石、22：巻線コイル、23：支持枠、24：固定枠、25：複合式支持脚、26：第2の加速度センサ、27：フィルタ、28：床振動フィードフォワード補償器、29：逆起電力検出回路。

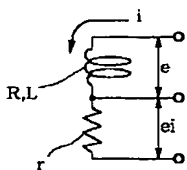
【図 1】



【図 4】

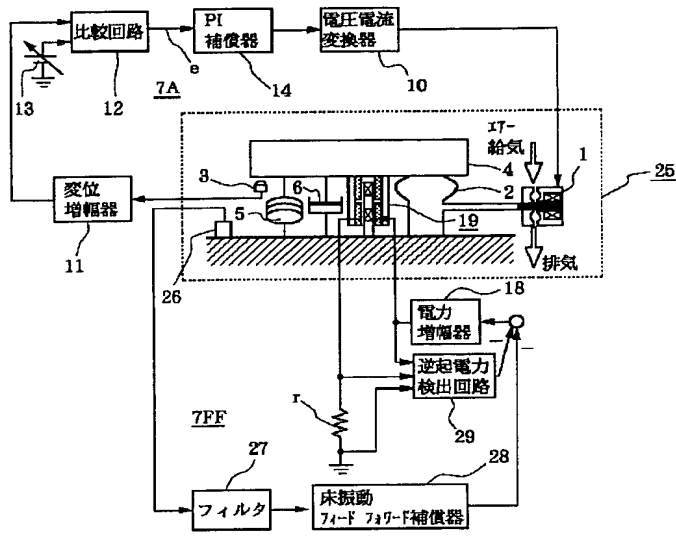


【図 7】



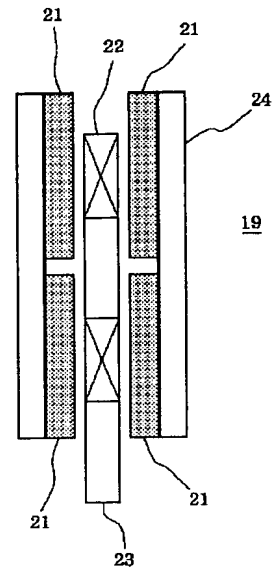
逆起電力検出の原理説明図

【図 2】



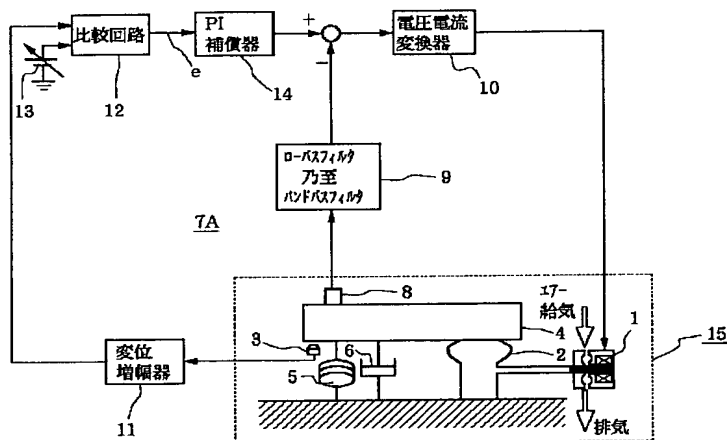
本発明の第二の実施例に係る複合防振装置の構成

【図 5】



VCMの一構造

【図 3】



空気バネをアクチュエータとする能動的除振装置の構成

